



A Comprehensive Review of the Corrosion and Erosion Resistant Coating on the Fireside in Power Plant Boilers

Majid Mirzaee^{*1}, Tayyebah Mohebbi², Davar Rezakhani³

¹Assistant professor, Non-metallic Materials Research Group, Niroo Research Institute, Tehran

² Ph.D Student, Chemistry Department, Kashan university, Kashan

³ Researcher, Metallurgu Group, Niroo Research Institute, Tehran

Received: 30 Apr 2023 Accepted: 11 Aug 2023

Abstract

Conventional steels and their alloys are not able to withstand high temperature corrosion in thermal power plant boilers. For boiler fireside components, issues of concern include erosion and corrosion in operating environments. Different thermal spray coating techniques have been developed to spray different types of coatings on boiler steels. Advances in thermal spraying techniques have led to the development of coatings with corrosion resistance properties. In this article, firstly, the introduction and the necessity of applying the coating used for boiler equipment is stated, then the studies carried out until today about the performance, developments and applications of thermal spray coatings for resistance to high temperature corrosion were examined, and finally a case study of using this coating in a power plant was mentioned. Among the types of coatings, Ni-20Cr alloy and their composite with carbide compounds is the most optimal coating with good performance in all types of boilers.

Keyword: Corrosion, Erosion, Boiler, Coating.

* mjmirzeai@nri.ac.ir

مرور جامع بر پوشش مقاوم به خوردگی و فرسایش سمت آتش در بویلرهای نیروگاه

مجید میرزایی^{1*}، طیبه محبی²، داور رضاخانی³

¹ استادیار، عضو هیات علمی، گروه پژوهشی مواد غیرفلزی، پژوهشگاه نیرو، تهران

² دانشجوی دکتری تخصصی، دانشکده شیمی/دانشگاه کاشان، کاشان

³ پژوهشگر، گروه پژوهشی متالورژی، پژوهشگاه نیرو، تهران

دریافت: 1402/02/10 پذیرش: 1402/05/20

چکیده

فولادهای معمولی و آلیاژهای آنها قادر به مقاومت در برابر خوردگی دمای بالا در بویلرهای نیروگاه حرارتی نیستند. برای اجزای سمت آتش بویلر، مسائل مورد توجه شامل فرسایش و خوردگی در محیط‌های عملیاتی است. تکنیک‌های مختلف پوشش اسپری حرارتی برای پاشش انواع مختلف پوشش‌ها بر روی فولادهای بویلر توسعه یافته است. پیشرفت‌ها در تکنیک‌های پاشش حرارتی منجر به توسعه پوشش‌هایی با خواص مقاومت در برابر خوردگی شده است. در این مقاله ابتدا مقدمه و ضرورت به کارگیری پوشش به کار رفته برای تجهیزات بویلر بیان شده، در ادامه مطالعات صورت گرفته تا به امروز درباره عملکرد، پیشرفت‌ها و کاربردهای پوشش‌های اسپری حرارتی برای مقاومت در برابر خوردگی دمای بالا بررسی شد و در نهایت به مطالعه موردی از به کارگیری این پوشش در یک نیروگاه بیان شد. در میان انواع پوشش‌ها، آلیاژ Ni-20Cr و کامپوزیت آن‌ها با ترکیبات کاربیدی بهینه‌ترین پوشش با عملکرد متناسب در انواع بویلرها است.

کلمات کلیدی: خوردگی، فرسایش، بویلر، پوشش.

* mjmirzaei@nri.ac.ir

1- مقدمه

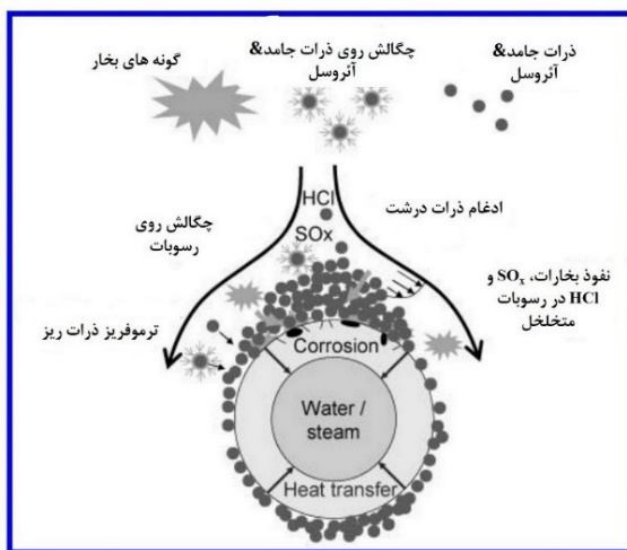
موادی مانند فولادها در معرض انواع مختلفی از شرایط کاری در دمای بالا قرار می‌گیرند. این استفاده از فولادها در دمای بالا منجر به مشکل خوردگی می‌شود. ژانگ تعریف کرده بودند که خوردگی فولاد بویلر به دلیل اکسیداسیون مواد در دمای بالا است [1]. زغال سنگ مورد استفاده برای بویلرها، حاوی گوگرد، سدیم و وانادیم به عنوان ناخالصی است. این ناخالصی‌ها با اکسیژن واکنش داده و اکسیدهایی تولید می‌کنند که مستعد خوردگی هستند. گوگرد با اکسیژن واکنش می‌دهد و SO_2 تولید می‌کند و تا حدی به SO_3 اکسید می‌شود. همانطور که توسط سریکانت و همکاران گزارش شده است، سدیم و وانادیم با اکسیژن واکنش می‌دهند و اکسیدهای سدیم و وانادیوم را تشکیل می‌دهند [2]. این اکسیدها با یکدیگر ترکیب می‌شوند و اکسیدهای پیچیده Na و V را تشکیل می‌دهند که معمولاً به عنوان وانادات شناخته می‌شوند. خوردگی داغ به عنوان خوردگی تسریع شده ناشی از حضور آلودگی‌های نمکی مانند $NaCl$ ، Na_2SO_4 و V_2O_5 که با هم ترکیب می‌شوند و رسوبات مذاب را تشکیل می‌دهند که اکسیدهای سطح محافظ را از بین می‌برند [3]. پدیده خوردگی داغ در دو مرحله رخ می‌دهد. 1) مرحله شروع خوردگی داغ: در طول مرحله شروع، عناصر موجود در آلیاژ اکسید می‌شوند و الکترون‌ها از اتم‌های فلزی به مواد قابل احیا در رسوب منتقل می‌شوند. یک سد محصول واکنش در زیر رسوب روی سطح آلیاژ تشکیل می‌شود که ویژگی‌های حاصل از واکنش گاز-آلیاژ را نشان می‌دهد. در نهایت سد محافظ ایجاد شده از طریق اکسیداسیون انتخابی بی‌اثر می‌شود و فرآیند خوردگی داغ وارد مرحله انتشار می‌شود (2) حالت‌های انتشار خوردگی داغ: مرحله انتشار توالی خوردگی داغ مرحله‌ای است که برای آن سوپر آلیاژ باید از سرویس حذف شود زیرا این مرحله همیشه نرخ خوردگی بسیار بیشتری نسبت به همان سوپر آلیاژ در مرحله شروع دارد [4]. خوردگی داغ می‌تواند توسط دو مکانیسم به نام خوردگی داغ نوع I و نوع II رخ دهد که به ترتیب به عنوان خوردگی داغ با دمای بالا (HTHC) و خوردگی گرم با دمای پایین (LTHC) نیز شناخته می‌شوند [5]. HTHC نوع I در محدوده دمایی حدود 825-950 درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود (نقطه ذوب Na_2SO_4 خالص 884 درجه سانتی‌گراد است) [6]. این نوع حالت با تشکیل سولفیدها و کاهش متناظر جزء واکنشی در بستر آلیاژی مشخص می‌شود [7]. در نیروگاه‌های زغال سنگ، خوردگی سمت آتش شامل خوردگی داغ از نوع II است. Na_2SO_4 یا K_2SO_4 که از واکنش SO_2 با $NaCl$ یا KCl (موجود در زغال سنگ) به وجود می‌آید، رسوبات نمک اصلی در خاکستر است. از آنجایی که حداکثر دمای دیواره بیرونی لوله‌های تولید بخار از 550 درجه سانتی‌گراد تا 650 درجه سانتی‌گراد متغیر است، تا زمانی که رسوبات سولفات با SO_3 واکنش ندهند و پیروسولفات‌ها را تشکیل دهند، خوردگی داغ صورت نمی‌گیرد. برای واکنش زیر:



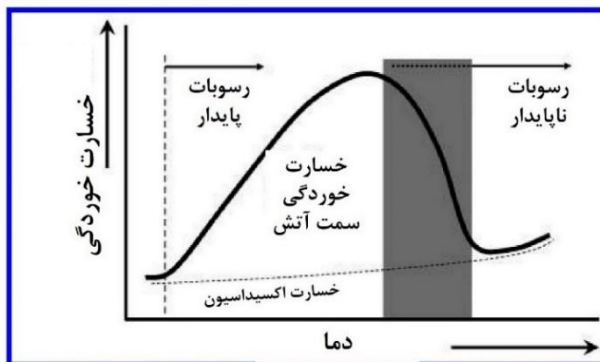
میزان SO_3 حدود 150 ppm و برای واکنش با Na_2SO_4 ، نیاز SO_3 حدود 2500 ppm است. هنگامی که پیروسولفات‌ها تشکیل می‌شوند، مخلوط پیچیده این دو مذاب در حدود 451 درجه سانتی‌گراد برای نمک پتاسیم و 551 درجه سانتی‌گراد برای نمک سدیم ایجاد شده و خوردگی داغ شدید رخ می‌دهد [8]. نفت کوره و زغال سنگ باقیمانده به دلیل کمبود سوخت‌های با عیار بالا و دلایل مالی به طور گسترده در سراسر سیستم‌های تولید انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سوخت‌ها شامل ناخالصی‌هایی هستند که در نقطه ذوب پایین روی سطح مواد ترکیباتی ایجاد می‌کنند و باعث خوردگی می‌شوند. چنین ترکیباتی معمولاً به عنوان خاکستر شناخته می‌شوند [9]. خاکستر مذکور

روی سطح مواد می‌نشینند و باعث خوردگی می‌شود. تخریب مواد زمانی اتفاق می‌افتد که این ترکیبات ذوب شده، لایه‌های اکسید محافظی را که به طور طبیعی بر روی مواد در طول عملیات دیگ/توربین گاز تشکیل می‌شوند، حل می‌کنند. عدم اجتناب یا حداقل تشخیص خوردگی داغ در مراحل اولیه منجر به حوادث بسیاری شده است که منجر به تلفات جانی و زوال مواد شده است. علاوه بر هزینه‌های مستقیم ناشی از خاموشی و از دست دادن بهره‌وری، ده‌ها میلیارد دلار به طور معمول برای تعمیر سازه‌ها، ماشین‌آلات و تجهیزات خورده هزینه می‌شود و همچنین تخریب ناگهانی مواد می‌تواند منجر به ناتوانی انسان یا حتی خطر جانی شود [10]. نیروگاه‌ها به دلیل خوردگی لوله‌های بویلر و سایر اجزاء با خاموش شدن مواجه می‌شوند. یکی از مشکلات صنعت برق کشور، خوردگی سمت آتش تجهیزات بویلر نیروگاه‌ها می‌باشد. در رابطه با خوردگی بویلرهای داخل کشور آمار دقیقی در دسترس نمی‌باشد، اما در کشورهای صنعتی آمار مربوط به این نوع زوال جمع آوری شده است. بعنوان مثال در کشور آمریکا، 40 درصد از واحدهای نیروگاهی این کشور دارای خوردگی سمت آتش بوده اند که خسارت مربوطه بالغ بر 1/7 میلیون دلار به ازای هر بویلر در هر سال بوده است. در کشور کانادا، 25 درصد از خروجی‌های اضطراری، ناشی از تخریب لوله‌های بویلر نیروگاهی گزارش گردیده است که قسمت عمده این تخریب‌ها ناشی از خوردگی و سایش بوده است. خوردگی، دمای بخار بویلر را کاهش می‌دهد و راندمان حرارتی بویلر را کاهش می‌دهد. لوله‌های واتروال به طور سنتی با دمای فلز تا 400 درجه سانتی‌گراد و شار حرارتی 350 کیلو وات بر متر مربع کار می‌کنند [11]. این لوله‌ها از فولادهای فریتی کم آلیاژ ساخته شده‌اند. رسوبات از نوع سرباره می‌توانند روی سطوح آنها تشکیل شوند و انتقال حرارت را محدود کنند [12]. خوردگی سمت آتش لوله‌های دیواره آب به شدت تحت تاثیر حضور ترکیبات FeS در رسوبات سطحی و قرار گرفتن در معرض شرایط احیایی قرار می‌گیرد [13]. شرایط احیایی می‌تواند به دلیل موارد برخورد شعله به لوله‌ها، استفاده از مشعل‌های با میزان کم NO_x؛ و استفاده از هوای بیش از حد تقویت شده (BOFA) که باعث کاهش بیشتر تشکیل NO_x حرارتی می‌شود [9]. با حرکت به سمت سیستم‌های بخار با دما و فشار بالاتر، شرایط عملکرد لوله‌های دیواره آب تغییر کرده و استفاده از فلزات با کارکرد دمای بالاتر را ایجاب می‌کند و به استفاده از فولادهای فریتی با عناصر آلیاژی بالاتر، به‌ویژه در قسمت‌های بالایی این دیوارها نیاز است. برای لوله‌های سوپرهیتر/ری هیتر، مشخص شده است که تشکیل رسوبات در اطراف این لوله‌ها بخش مهمی از فرآیند تخریب است، با رسوب‌هایی که از طریق ترکیبی از مکانیسم‌ها [14]، از جمله به هم فشردگی مستقیم ذرات بزرگ‌تر، به هم فشردگی گردابی ذرات، ترموفورزدرات کوچکتر و چگالش بخار تشکیل می‌شوند (شکل 1). خوردگی سمت آتش معمولاً توسط گونه‌های سولفات قلیایی در رسوب ایجاد می‌شود و با محیط مجاور و سایر اجزای رسوبی واکنش نشان می‌دهد تا مخلوط‌هایی با دمای ذوب کم در سطوح لوله (مانند پیروسولفات‌های قلیایی یا تری سولفات‌های آهن قلیایی) تولید کند [15]. اعتقاد بر این است که آسیب خوردگی سوپرهیتر و دیگر ری‌هیترها با افزایش دما از یک سری منحنی‌های زنگ‌شکل پیروی می‌کند، زیرا رسوبات مختلف نقطه ذوب پایین دارای محدوده پایداری مشخصی هستند (شکل 2). با افزایش دما و فشار بخار، مواد مورد نیاز برای سوپرهیترها و ری‌هیترها باید از فولادهای فریتی و فولادهای زنگ‌نزن با عناصر آلیاژی کم به فولادهای زنگ‌نزن آلیاژی با مقادیر بالاتر و آلیاژهای مبتنی بر نیکل تغییر کنند تا بتوانند عمر خزش کافی را حفظ کنند [16]. با این حال، نرخ خوردگی سمت آتش نیز به طور قابل توجهی با دما افزایش می‌یابد، همانطور که توسط منحنی‌های زنگ‌شکل نشان داده می‌شود، بنابراین دمای فلز برای مکانیسم خوردگی تری سولفات آهن قلیایی (و هر مکانیسم

خوردگی سولفات قلیایی با دمای بالاتر) اهمیت فزاینده‌ای پیدا می‌کند. آلیاژهای نامزد فعلی برای بویلرهای نیروگاه فوق بحرانی (USC) و پیشرفته (A-USC) در جدول 1 با اشاره به عناصر آلیاژی اصلی و اجزای بالقوه آنها فهرست شده است. فولادهای سنتی مورد استفاده در نیروگاه های حرارتی نمی‌توانند مشکلات خوردگی را تحمل کنند. برای مقابله با آسیب خوردگی در سمت آتش و ایجاد طول عمر کافی، ممکن است لازم باشد که پوشش‌های محافظ روی چنین لوله‌های مبدل حرارتی ایجاد و استفاده شود. در سال‌های اخیر، محققان از اشکال مختلفی از پوشش‌ها برای بهبود حفاظت در برابر اکسیداسیون و خوردگی فولادها استفاده کرده‌اند. روش‌های پوشش اسپری حرارتی به ابزارهای مهمی برای بهبود مقاومت سایش ساینده برای بهبود کارایی و عمر محصول تبدیل شده‌اند [18]، مواد مختلف و تکنیک‌های پوشش‌دهی متفاوتی در این رابطه مورد استفاده قرار گرفته است. نوع پوشش و روش پوشش‌دهی انتخابی به پارامترهای مختلف از جمله عوامل خوردگی و اکسیداسیون، عوامل سایش، تجهیزات قابل دسترس، هزینه‌های پوشش‌دهی و جنبه‌های اقتصادی بستگی دارد و بسته به طراحی بویلر و شرایط سرویس تعیین می‌گردد.



شکل 1- فرآیند رسوب‌گذاری بالقوه در اطراف لوله‌های سوپرهیتور-ری هیتر در سیستم برق با سوخت پودر شده [9]



شکل 2- منحنی زنگی شکل مشخصه برای مکانیسم آسیب خوردگی در کنار آتش [11]

جدول 1- آلیاژهای کاندید برای اجزای مختلف نیروگاه [19]

کد ASME	کاربرد	ترکیب نامی	آلیاژ
2063	P, SH/RH*	57 Ni-22Cr-14W-2Mo-La	Haynes 230
-	P, SH/RH	50Ni-25Cr-20Co-2Ti-2Nb-V-Al	INCO740
1956	P, SH/RH	55Ni-Cr-0.3W-8Mo-11Co-Al	CCA617
-	SH/RH	43Ni-23Cr-6W-Nb-Ti-B	HR6W
-	SH/RH	18Cr-8Ni-W-Nb-N	Super304H
-	P	12Cr-W-Co-V-Nb-N	Save12
2179	WW	9Cr-2W-Mo-V-Nb-N	NF 616 (P92)
2199	WW	2-1/4Cr-1.5W-V	HCM2S (P23)
-	WW	12Cr-1Mo-1W-V-Nb	HCM12
2159	SH/RH	18Cr-10Ni-Nb	347HFG
-	SH/RH	20Cr-25Ni-Nb-Ti-N	NF 709
2113	SH/RH	25Cr-20Ni-Nb-N	HR3C
2180	P	12Cr-1.5W-Mo-V-Nb-N	HCM12A(P122)
1409	P	21.5Cr-9Mo-5Fe-3.6Nb-Al-Ti	IN625
2315	T	Ni-33Fe-25Cr-N	HR120
-	P	9Cr-1Mo-1W-V-Nb-N	E911
-	-	22Cr-25Ni-3.5W-3Cu-Nb-N	Sanicro25

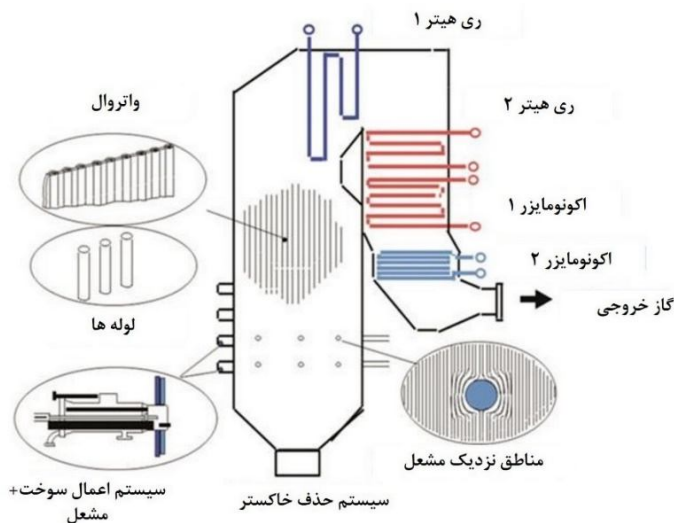
P*=لوله، SH= سوپرهیتر، RH= ری هیتر، WW= واتروال

2- ضرورت به کارگیری و نوع پوشش به کار رفته برای تجهیزات بویلر

دلایل شکست بسیاری از عناصر تاسیسات فعال در صنعت نیروگاه، فرآیندهای ترکیبی فرسایش و خوردگی است که در دماهای بالا رخ می‌دهد. این فرآیندها در محفظه احتراق، روی سطوح سوپرهیترها و اکونومایزرها، و همچنین در سیستم‌های تغذیه سوخت و هوا و حذف خاکستر شدیدترین هستند. طرحی که عناصر نصب بویلر را که در معرض شدیدترین سایش فرسایشی-خوردنده قرار دارند در شکل 3 نشان داده شده است [20]. خوردگی در دمای بالا سوپرهیترها ناشی از گازهای دودکش حاوی کلر در محفظه های احتراق بوده که معمولاً اکسیداسیون یا سولفیداسیون را تسریع می‌کند. خوردگی در دمای بالا فولادهای بویلر رسوب نشانی شده با پوشش‌های مختلف در اتمسفرهای حاوی کلر اکسید کننده و احیا کننده در گزارشات مختلف مورد بحث قرار گرفت. نتیجه به این صورت بود که که مقاومت به خوردگی مواد بالک به ویژگی‌های مقیاس‌های اکسید و سولفید تشکیل شده در شرایط آزمایش بستگی دارد، در حالی که در مورد پوشش‌ها، ساختار پوشش و ترکیب پوشش، قابلیت محافظ پوشش را تعیین می‌کند. اولین و اساسی‌ترین روش برای محدود کردن فرآیندهای فرسایش- خوردگی، بهینه سازی ساخت محافظ بویلر و عناصر نصب است که نمونه‌ی آن بهینه‌سازی شکل و سرعت جریان گرد و غبار و گاز احتراق است، به طوری که سایش عناصر حیاتی بویلر را به حداکثر کاهش دهد. راه‌حل‌های دیگر، ایجاد برآمدگی در کانال‌های اگزوز، ورق‌های دریچه گاز نزدیک به هیترها، و همچنین اصلاحات آستری یا گوشه‌های محافظه احتراق است. در جاهایی که اصلاحات ساختمانی تاثیر خوبی ندارد، از انواع خاصی از مواد همراه با افزایش ضخامت آنها استفاده می‌شود و در صورت کافی نبودن، از پوشش‌های مخصوصی استفاده می‌شود که مقاومت به خوردگی و فرسایش بالایی دارند. متأسفانه استفاده

از پوشش‌های سرامیکی نسبتاً ضخیم کارایی تبادل حرارت را محدود می‌کند و جرم ساختمانی سیستم را افزایش می‌دهد و تغییر در هندسه ناحیه اطراف آنها باعث ایجاد مناطقی با اختلالات شدید جریان بستر می‌شود که منجر به آسیب شدید به دیوارها می‌شود. چنین مناطقی، اگر به موقع تشخیص داده نشوند، اغلب منجر به خرابی تجهیز بویلر می‌شوند. نمونه‌هایی از آسیب لوله ناشی از فرسایش - خوردگی در شکل 4 ارائه شده است. شرایط عملکرد واقعی موجود در بویلرها عبارتند از: (1) سایش ذرات ساییده ناشی از برخورد ذرات خاکستر سخت در زوایای مختلف، (2) دمای عملیاتی بالا (بر روی عناصر فلزی، حدود 550 درجه سانتیگراد است)، و عملکرد خورنده محصولات احتراق سوخت. این امر استفاده از پوششی که مشخصه سختی بالا و چسبندگی خوب هستند، را تقویت می‌کند و به دست آوردن ضخامت بهینه، تخلخل کم و یک ترکیب فاز پیچیده را ممکن می‌سازد که مقاومت در برابر خوردگی بالا در برابر ترکیبات حاوی گوگرد، کلر و بخار آب با کاهش اکسیژن را تضمین می‌کند. در بین روش‌های متعدد ایجاد پوشش محافظ، تنها پاشش حرارتی اجازه تولید پوشش‌هایی با ویژگی‌های فوق را می‌دهد. مزیت بزرگ پاشش حرارتی در مقایسه با روش‌های متعارف مانند جوشکاری پد، سرعت و تحرک بالای فرآیند است که امکان تولید و ترمیم پوشش‌ها را مستقیماً در بویلرها حتی در زمان توقف کوتاه فراهم می‌کند. روش‌های پاشش حرارتی محدودیت مواد قابل توجهی در رابطه با پوشش و ترکیب پایه ندارند و امکان تولید پوشش‌هایی با سختی بالا و ضخامت در حد چند میلی‌متر [21] را می‌دهند. در میان روش‌های پاشش حرارتی، در عمل برای حفاظت از عناصر بویلرها، از روش‌های شعله، قوس، پلاسما و HVOF استفاده می‌شود. روش‌های شعله و پلاسما به دلیل پیچیدگی فرآیند یا هزینه‌های نسبتاً بالا (پلاسما) به ندرت مورد استفاده قرار می‌گیرند. نمونه‌ای از فناوری پاشش مورد استفاده و نوع ماده پوشش در جدول 2 ارائه شده است. پرکاربردترین روش اسپری حرارتی روش قوس الکتریکی است. بزرگترین مزیت آن امکان پوشش موثر روی سطوح بزرگ است که در هزینه‌های نسبتاً پایین تولید پوشش منعکس می‌شود. توسعه روش و خواص مفید بالای پوشش‌ها ناشی از استفاده از مواد کامپوزیتی پیشرفته است که به دست آوردن پوشش‌هایی از ترکیب فاز طراحی شده را ممکن می‌سازد. یکی از اشکالات این پوشش‌ها تخلخل آنهاست که با استفاده از مواد با کیفیت بالا و همچنین پوشش‌های سیل اضافی کاهش می‌یابد. جدیدترین فناوری، روش پاشش حرارتی مافوق صوت است که امکان تولید پوشش‌های کاربرد با کیفیت بالا را فراهم می‌کند. مشخصه این پوشش‌ها در موارد زیر است: سختی بالا (تا 1600 در مقیاس ویکرز)، چگالی پوشش بالا (تخلخل زیر 2%) و چسبندگی بالا (بالای 80 مگا پاسکال). ویژگی‌های روش‌های سرعت بالا موضوع نسبتاً گسترده‌ای است و در نشریات مختلف مورد بحث قرار گرفته است [22، 23]. شکل 5 نمونه‌هایی از پوشش‌های تولید شده با استفاده از روش‌های پاشش حرارتی مورد بحث را بر روی قطعات بویلر را نشان می‌دهد. موضوع بسیار مهم در فرآیند پاشش حرارتی استفاده از مواد پوششی مناسب است. روش تولید مواد پوششی تأثیر تعیین کننده‌ای بر امکان استفاده از آنها برای فناوری‌های مختلف پاشش حرارتی دارد. برای روش‌های قوس الکتریکی، سیم‌های جامد استفاده می‌شود، در حالی که در روش‌های با سرعت بالا از مواد پودری استفاده می‌شود. تولیدکنندگان مواد از فناوری‌های پیشرفته‌ای استفاده می‌کنند که امکان تولید مواد با ترکیب شیمیایی و فازی فرضی و پیچیده و همچنین مورفولوژی ذرات مشخص شده را ممکن می‌سازد. ساختار چنین موادی برای روش پاشش حرارتی معین بهینه شده است و شامل ویژگی دگرگونی‌هایی است که در طی فرآیند پاشش حرارتی، تشکیل و استفاده از پوشش در ماده رخ می‌دهد. این ماده به ویژه برای مواد پودری با ترکیب شیمیایی و

فازی فرضی ضروری است، جایی که شکل کروی، چگالی بالا و ساختار ریزدانه مطلوب است. چنین پودرهایی را می‌توان با روش‌های اتمیزه کردن از فاز مایع، آگلومراسیون و زینترینگ و همچنین سنتز مکانیکی و دمای بالا تولید کرد و اغلب تحت عملیات پلاسمایی اضافی قرار می‌گیرند. مواد پوشش منتخب مورد استفاده برای پاشش حرارتی پوشش‌ها به منظور به کارگیری در صنعت برق در جدول 3 ارائه شده است.



شکل 3- عناصر آسیب‌پذیر بویلر در برابر سایش- خوردگی [24]



شکل 4- نمونه‌های معمول سایش فرسایشی در بویلرهای سیال شده: (الف) ناحیه روی پوشش سرامیکی، (ب) ناحیه انتقال در پوشش‌های اسپری حرارتی، (ج) آسیب ناشی از فرسایش دیوار، و (د) لوله سوپرهیتر آسیب‌دیده [24]

جدول 2- انتخاب مواد و تکنولوژی برای شرایط مختلف عملیاتی [24]

ردیف	نوع مکانیزم	روش پاشش	گروه مواد
1	خوردگی اتمسفری	شعله	سیم: روی، آلیاژ روی-آلومینیوم، آلومینیوم، آلومینیوم، آلیاژ آلومینیوم- منیزیم پودر: اکسید آلومینیوم، اکسید کروم، آلیاژ اکسید آلومینیوم- اکسید تیتانیوم
		قوس	مانند قبل + فولادهای ضد زنگ، آلیاژهای مبتنی بر NiCr
2	خوردگی دمای بالا	شعله	سیم ها: آلومینیوم، آلیاژی با محتوای کروم بالا با بستر نیکل یا آهن پودرها: ZrO_2 , $ZrO_2 + Y_2O_3$, Al_2O_3
		پلاسما	ZrO_2 اصلاح شده با $ZrO_2 - Y_2O_3$ و موارد دیگر
		قوس	آلومینیوم، آلیاژهای با محتوای کروم بالا با بستر نیکل یا آهن
3	فرسایش	شعله	پودرهایی از نوع خود روان با ذوب مجدد
		قوس	سیم های مبتنی بر آهن یا نیکل اصلاح شده با فازهای کاربید، بورید و غیره.
		HVOF	انواع پودرهای کامپوزیت: $WC-CrC-Ni$, $NiCr-Cr_3C_2$, $WC-Co-Cr$, $WC-Co$ و دیگران
4	سایش-خوردگی در دمای بالا	قوس	سیم های مبتنی بر نیکل اصلاح شده با فازهای کاربید، بورید و غیره.
		HVOF	پودرهایی از نوع $NiCr-Cr_3C_2$, $NiCr-Cr_3C_2$ با افزودنی های اصلاح کننده مانند: $NiCr-Cr_3C_2-TiC$ یا $WC-Cr_3C_2-NiCr$



شکل 5- ایجاد پوشش ها به روش: HVOF و روش قوس الکتریکی روی عناصر بویلر [24]

جدول 3- مواد معمولی مورد استفاده برای پاشش حرارتی پوشش‌ها روی عناصر بویلر [24]

کاربرد	ترکیب/ سختی	نام ماده	روش پاشش/ نوع مواد
فولاد آستنیتی با محتوای کربن پایین، پوشش‌های مقاوم در برابر خوردگی	Fe-18Cr-8.5Mn-5Ni-1Si- 0.155C	Metcoloy 5	قوس/ سیم
فولاد با محتوای بالای کروم، پوشش‌هایی با سختی بالا، مقاومت در برابر سایش و مقاومت در برابر خوردگی	Fe-28Cr-5c-1Mn	SM 8222	
آلیاژ مقاوم در برابر خزش با درجه حرارت بالا با مقاومت در برابر اکسیداسیون و خوردگی تا 1000 درجه سانتیگراد، مشابه Inconel 625	Ni 21.5 Cr-8.5Mo-3Fe-0.5Co	SM 8625	
مشابه SM8625	-	IN 625	
آلیاژ مقاوم در برابر خزش در دمای بالا که برای بازسازی آلیاژ Inconel 718 طراحی شده است، دارای مقاومت حرارتی بالا و مقاومت در برابر خوردگی تا 1000 درجه سانتیگراد	Ni-19Cr-18Fe-3Mo	SM 8718	
طراحی شده برای پاشش پوشش‌های سخت، مقاوم در برابر سایش و خوردگی	FeCr ₂₃ B ₃ CWSiMo	W-685.1	
-	FeAlCrB	FMI-2	
مقاومت در برابر سایش و فرسایش بسیار بالا، قابل استفاده تا 773 درجه کلوین، مقاومت در برابر خوردگی کم	1100-1450	WC-Co	HVOF
مقاومت در برابر سایش کاپیتاسیون بسیار خوب، مقاومت در برابر خوردگی خوب در محلول‌های آبی	1250-1450	WC-Co-Cr	
برای استفاده تا 933 درجه کلوین، مقاومت در برابر خوردگی بسیار خوب در محلول‌های آبی	1050-1350	WC-CrC-Ni	
مقاومت در برابر سایش بالا، قابل استفاده تا 1173 درجه کلوین، خواص تریبولوژیکی خوب، مقاومت در برابر خوردگی بسیار خوب در گازهای حاوی گوگرد، مقاومت در برابر خوردگی بسیار خوب در محلول‌های آبی	800-1100	Cr ₃ C ₂ -NiCr	

پوشش‌های تولید شده توسط شرکت‌های تجاری مختلف که در پایان دهه 1990 اعمال شد، تمام انتظارات فنی و اقتصادی صنعت برق را برآورده نکرد. با توجه به شرایط سایش و خوردگی موجود در عناصر تاسیسات برق، به ویژه در بویلر، پوشش‌های محافظ اعمال شده باید دارای ساختار متراکم، سختی بالا و مقاومت در برابر فرسایش و خوردگی خوب باشند. چنین خواصی را می‌توان در پوشش‌های تولید شده با روش‌های HVOF و قوس الکتریکی و همچنین در پوشش‌های ذوب مجدد یافت. دستیابی به پوشش‌های باکیفیت به ویژه با تخلخل کم (حدود 1%) و همچنین سختی بالا، مستلزم استفاده از مواد پوشش دهنده با کیفیت بالا و دستگاه‌های تولید پوشش خوب و همچنین رعایت تمام دستورالعمل‌های فرآیند، یعنی آماده‌سازی سطح مناسب، شرایط اقلیمی مناسب، پارامترهای بهینه پاشش حرارتی و عملیات نهایی مناسب پوشش‌ها می‌باشد. با کیفیت‌ترین پوشش‌های حاوی کاربید به روش HVOF به دست می‌آید. در محدوده تحقیق ارائه شده، پودرهای منتخب ارائه شده در جدول 4 با استفاده از سیستم Diamond Jet 2600 و

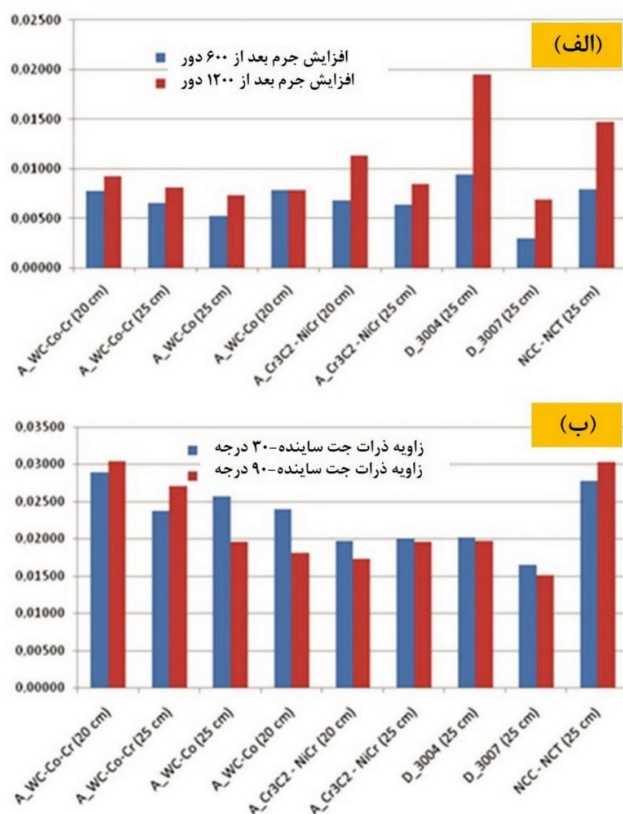
با پارامترهای تکنولوژیکی متنوع فرآیند بر روی زیرلایه‌های فولادی اسپری شدند. نتایج آزمایش سایش انجام شده در تستر T07 در شکل 6 (الف) ارائه شده است. آزمایش‌های فرسایش با جهش ساینده گریز از مرکز انجام شد. برای آزمایش از آلوکسیت کلاس 100 استفاده شد. نتایج آزمون در شکل 6 (ب) نشان داده شده است. گروه دیگری از پوشش‌های مورد استفاده با روش پاشش حرارتی قوس الکتریکی تولید می‌شوند. این‌ها پوشش‌های فلزی هستند که با تخلخل تا چند درصد مشخص می‌شوند (به دلیل عملکرد در یک فضای خورنده تهاجمی، تخلخل تا حد ممکن کمتر باشد). تخلخل ساختار به طور قابل توجهی تحت تأثیر انتخاب مناسب مواد، دستگاه و پارامترهای تکنولوژیکی تولید پوشش قرار می‌گیرد. نمونه‌هایی از مواد سیمی مورد استفاده در کاربرد این نوع در جدول 4 نشان داده شده است. جهت دیگر توسعه پوشش، اصلاح محلول موجود است. یکی از بهترین‌ها اصلاح مواد تشکیل‌دهنده پوشش FeAlCrB از نسخه‌های FMI-2 تا FMI-3 با سطح بالاتر آلومینیوم [27] است (جدول 5). این نوع پوشش به مدت 13 سال با موفقیت کار می‌کند و تعمیرات دوره‌ای همچنان وضعیت رضایت بخشی پوشش را نشان می‌دهد.

جدول 4- پودرهای حاوی کاربرد مورد بررسی [24]

ردیف	نام ماده	ترکیب شیمیایی پودر	اندازه پودر گرانوله شده (μm)
1	A558.074	WC-Co-Cr (86/10/4)	-45+15
2	A518.074	WC-Co (88/12)	-45+22
3	A584.054	Cr ₃ C ₂ -NiCr (75/25)	-45+10
4	D 3004	Cr ₃ C ₂ -25(Ni 20Cr)	-45+20
5	D 3007	Cr ₃ C ₂ -20(Ni 20Cr)	-45+20
6	NCC-NCT	Cr ₃ C ₂ -25(Ni 20Cr + mod.)	-45+15

جدول 5- انواع مواد سیمی به کار رفته برای پاشش اسپری [24]

ردیف	نام ماده	ترکیب شیمیایی پودر
1	FMI-3	FeAlCrB
2	W-685	Fe-Cr-B
3	M5	Fe-Cr-C
4	SF27	Fe-Ni-Cr-Si-B
5	NGK	WC-Cr-Co
6	FMI-2B	Fe-Al-Cr-B
7	CE-595	Fe-Cr-Si-B



شکل 6- مقاومت در برابر سایش الف) مقاومت در برابر فرسایش ب) برای پوشش‌های پاشیده شده با HVOF مواد حاوی کاربرد [24]

3- بررسی پوشش‌های به کار رفته در تجهیزات بویلر در گزارشات

مشاهده شده است که زغال سنگ درجه پایین باعث خوردگی و عمل فرسایشی جدی در سطح لوله‌های بویلر و سوپرهیت‌رهای می‌شود که در دمای بسیار بالا کار می‌کنند [25، 26]. مکانیسم‌های مختلفی برای وقوع خوردگی داغ موجود است که مسئول تخلیه سطح فلز هستند. سه مرحله اصلی که در این فرآیند خوردگی داغ بر روی سوپرالیاژها دخیل است عبارتند از: اکسیداسیون معمولی، مرحله شروع که در آن خوردگی تسریع می‌یابد و مرحله انتشار که شکست مواد را در صورت وقوع سریع خوردگی هدایت می‌کند [27]. سینگ و همکاران [28] بررسی کردند که روش HVOF برای پاشش پودر NiCrAlY و NiCrAlY-SiC مناسب است. قبل از پوشش، فولاد T-91 با تشکیل مقیاس اکسید Fe_2O_3 تجزیه شد. پوشش‌ها به ترتیب به کاهش 94/62 و 95/77 درصد افزایش وزن کمک کردند. در دسترس بودن و تولید نتایج بهتری را در محیط اکسید کننده نشان داده است. سینگ و همکاران [29] یک پوشش بسیار متراکم و یکنواخت که تقریباً 120-130 میکرومتر اندازه‌گیری می‌شود، با تکنیک پوشش HVOF که بر روی فولاد T-22 رسوب می‌شود، به دست می‌آید. برای پوشش NiCrAlY تخلخل بین 1/64 و 17 درصد و برای NiCrAlY-20 wt SiC (N) بین 0/95 تا 0/97 درصد است. اکسیداسیون جزئی در طول فرآیند رسوب همراه با کربن زدایی ناچیز مشاهده می‌شود. کاهش در افزایش جرم اکسید نیز به ترتیب 93/98 درصد و 99/15 درصد در NiCrAlY و NiCrAlY-20 wt% SiC (N) مشاهده شده است. وانگ و همکاران [30] دستگاه جداکننده اسپری تفنگ انفجار

را توسعه داد و تأثیر آن را بر عملکرد پوشش WC-Co بررسی کرد. یافته‌ها نشان داد که سیستم جداسازی خواص پوشش‌های WC-Co اسپری شده با تفنگ D را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، محققان به این نتیجه رسیده‌اند که تخلخل پوشش‌ها کاهش یافته است، اما به طور کامل از تخلخل جلوگیری نشده است. سینگ و همکاران عملکرد پوشش‌های TiO_2 و Ni_3Al را روی فولاد بویلر T-91 در دمای 900 درجه سانتیگراد مورد مطالعه قرار دادند. نمونه‌ها با استفاده از فرآیند HVOF پوشش داده شدند. پس از پوشش دهی، نمونه‌ها به مدت 50 سیکل در اتمسفر محیط نمک مذاب $Na_2SO_4-60\% V_2O_5$ در دمای 900 درجه سانتیگراد نگهداری شدند. چرخه‌ها شامل 1 ساعت گرم کردن و 20 دقیقه خنک کننده در دمای اتاق بود. برای بررسی رفتار پوشش‌ها و میزان خوردگی در طول آزمایش از تکنیک‌ها ترموگراو متریک، پراش اشعه ایکس XRD، SEM/EDS استفاده شد. Fe_2O_3 ، Cr_2O_3 و Fe_3O_4 به عنوان فاز اصلی در نتایج آزمایش XRD یافت شدند. در نمونه T-91 با پوشش TiO_2 ، Ti_3O_5 به عنوان فاز اصلی در آزمایش XRD شناسایی شد. در نمونه پوشش داده شده با Ni_3Al ، فازهای NiO ، $NiAl_2O_4$ و $NiCr_2O_4$ به عنوان فاز اصلی در تکنیک‌های XRD، SEM/EDS شناسایی شدند. نتیجه نشان داد که پوشش Ni-20Cr بهتر از پوشش Ni-75Cr₃C₂-25 (Ni-20Cr) است. گویال و همکاران [31] رفتار خوردگی داغ پوشش‌های کامپوزیت اکسید کروم تقویت شده نانولوله‌های کربنی را در محیط بویلر واقعی یک نیروگاه حرارتی در دمای 900 درجه سانتی‌گراد تحت شرایط بارگذاری حرارتی چرخه‌ای بررسی کردند. محتوای CNT از 1 تا 8 درصد وزنی متغیر بود و پوشش‌ها با روش HVOF رسوب کردند. نویسندگان مشاهده کردند که نانولوله‌های کربنی با پر کردن حفره‌ها، شکاف‌ها و حفره‌های ریز در ریزساختار پوشش، به‌عنوان یک مانع فیزیکی برای گونه‌های خورده‌کننده عمل می‌کنند. پوشش‌ها افزایش وزن کمتری را همراه با تشکیل لایه‌های اکسید محافظ در طول آزمایش نشان دادند. سینگ و همکاران [32] پوشش‌های Ni-Cr و Cr_3C_2-NiCr را روی فولادهای بویلر T11، P91 با پوشش اسپری تفنگ انفجاری (D-Gun) رسوب دادند. فرآیند و رفتار خوردگی داغ آنها در محیط واقعی بویلر بررسی شد. محققان مشاهده کردند که نمونه‌های فولادی بویلر بدون پوشش بیشترین کاهش وزن را در بین تمام نمونه‌ها تجربه کردند. پوشش Cr_3C_2-NiCr به دلیل تشکیل Cr_2O_3 ، Cr_3O_2 و Ni_3Fe و Cr_3Ni_2 عملکرد بهتری نسبت به پوشش Ni-Cr در محیط واقعی بویلر نشان داد. سینگ و همکاران [33] رفتار خوردگی داغ پوشش‌های مختلف Cr_3C_2-NiCr روی فولاد لوله بویلر را در محیط نمک مذاب شبیه‌سازی شده در دمای 700 درجه سانتی‌گراد بررسی کرد. ریزساختارهای نمونه‌های خورده شده با پراش اشعه ایکس و میکروسکوپ الکترونی روبشی با آنالیز ترکیبی عنصری مشاهده شد. آنها دریافتند که پوشش $Cr_3C_2-90NiCr$ بالاترین مقاومت در برابر خوردگی را در مقایسه با $NiCr$ ، $Cr_3C_2-80NiCr$ و $Cr_3C_2-65NiCr$ ارائه می‌دهند. تشکیل لایه کروم کاربید بر روی سطح پوشش داده شده دلیل مقاومت به خوردگی بود. در این بررسی، عملکرد پوشش‌های Ni-Cr توسط محققین مختلف برای درک مکانیسم خوردگی داغ در محیط‌های مختلف ارائه شد. جدول 6 خلاصه‌ای از تحقیقات انجام شده توسط محققان مختلف در مورد پوشش‌های Ni-Cr برای کاربردهای دمای بالا با استفاده از فرآیندهای اسپری حرارتی را نشان می‌دهد.

جدول 6- خلاصه‌ای از تحقیقات روی پوشش‌های Ni-Cr با استفاده از فرآیند اسپری حرارتی

مرجع	یافته‌های مهم	محیط آزمون	فرآیند پوشش‌دهی	زیرلایه	ماده پوشش‌دهی
[34]	پوشش پاشیده شده Ni-50Cr توسط تفنگ انفجاری پایداری طولانی تری دارد، 1/37 ضخامت پس از 7 سال از بین می‌رود.	کارخانه زباله سوز واقعی	پاشش انفجاری، پاشش HVOF و پاشش پلاسما	آلیاژهای پایه نیکل و فولادها	Ni-20Cr, Ni-50Cr 100%Cr
[35]	تشکیل اکسید متخلخل، ذرات ذوب نشده و نیمه ذوب باعث کاهش مقادیر سختی شدند.	-	پاشش HVOF	فولاد ضد زنگ	Ni-20Cr
[36]	مقاومت در برابر خوردگی داغ از روند پیروی می‌کند پوشش NiCrAlY < پوشش Ni-20Cr < پوشش Ni ₃ Al < پوشش Stellite-6	Na ₂ SO ₄ -60% V ₂ O ₅ در شرایط آزمایشگاهی	پلاسما اسپری	سوپر آلیاژ مبتنی بر Fe (32Ni-21Cr-0.3Al-0.3Ti-1.5Mn-1.0Si-0.1C-Bal Fe)	NiCrAlY, Ni-20Cr, Ni ₃ Al Stellite-6
[37]	کاهش قابل ملاحظه ریزسختی و تخلخل	بویلرهای نیروگاه	پلاسما اسپری	ASTM-SA213-T-11 ASTM-SA213-T-22	Ni-پودرهای 20Cr Stellite-6
[38]	Ni-20Cr > Cr ₃ C ₂ -NiCr > NiCrBSi > Stellite-6	Na ₂ SO ₄ -60% V ₂ O ₅ در دمای 900 °C	HVOF	سوپر آلیاژ پایه آهن	NiCrBSi, Cr ₃ C ₂ -NiCr Ni-20Cr Stellite-6
[39]	تأثیر اندازه ذرات پودر بر خواص و عملکرد پوشش	بویلرهای نیروگاه	پاشش انفجار	نمونه‌های فولادی معمولی	سرامیک (Al ₂ O ₃)، فلز (Ni-20 wt % کروم)، سمنت (WC-12 wt % Co)
[40]	لایه اکسید، روی پوشش پس از قرار گرفتن در معرض دمای بالا از NiO، Cr ₂ O ₃ و NiMoO ₄ تشکیل شده است	مطالعات اکسیداسیون هوا در دمای 600 °C	روکش لیزری	Mo	Ni-20Cr
[41]	پوشش‌ها مقاومت اکسیداسیون فولاد را تا 85 درصد افزایش دادند.	بویلر واقعی در 700 °C	HVOF	A213 347H	Ni-20Cr
[42]	میانگین تخلخل کمتر از 0/58 درصد و زبری سطح 6/94-6/17 میکرومتر، استحکام باند 58 MPa و میکروسختی 920-697 Hv بود.	-	پاشش انفجار	سوپرآلیاژها	NoCrAlY+ CeO ₂ (0.4 wt. %)
[43]	پوشش Ni-20Cr پاشیده شده با HVOF انتخاب بهتری برای کاربردهای بویلر است	بویلر واقعی در 700 °C	D- و HVOF Gun	ASTM-SAE 213-T22	Ni-20Cr
[44]	پوشش پاشیده شده HVOF در محیط واقعی بویلر بهتر از نمونه اسپری سرد عمل کرد	بویلر واقعی در 700 °C	HVOF و پاشش سرد	SAE 213-T22	Ni-20Cr

4- مطالعه موردی درباره پوشش‌دهی واتروال و سوپر هیتز یک واحد 500 مگاواتی از یک نیروگاه بریتانیا

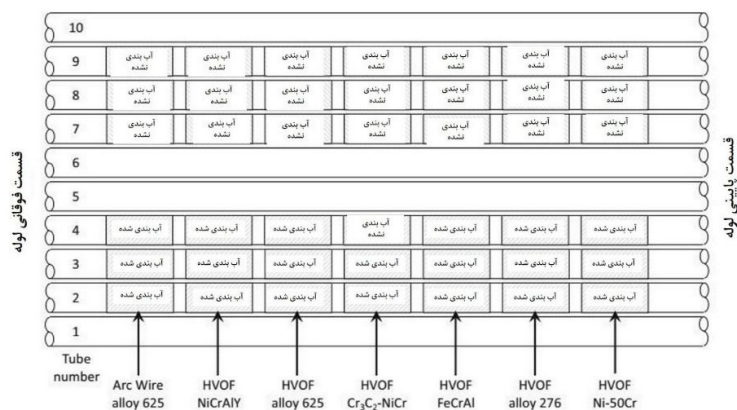
در این مطالعه پوشش‌های کاندید با استفاده از روش HVOF و پاشش سیم قوس الکتریکی اعمال شدند. پوشش‌های HVOF توسط یک تامین‌کننده پوشش تجاری با استفاده از پودرهای عرضه‌شده توسط Sulzer Metco، که در جدول 7 نشان داده شده است، اعمال شد [45]. قبل از نصب برخی لوله‌ها سطحشان سیل¹ شدند. ترکیب محلول فسفات بوده که با سطح پوشش واکنش داده و حفرات سطحی پوشش را واکنش داده و از دسترسی محیط احتراق به هر فضای خالی داخلی در پوشش جلوگیری می‌کند. لوله‌های 4/3/2 و 9/8/7 با نوارهایی به طول تقریبی 200 میلی‌متر از آلیاژهای 625 (با روش قوس و به کارگیری سیم)، NiCrAlY، Cr₃C₂، در بستر Ni-Cr، FeCrAl و Ni-50Cr پوشش داده شدند (شکل 7 و 8). به استثنای آلیاژ 625 که با پاشش سیم قوس الکتریکی اعمال می‌شود، همه پوشش‌ها با استفاده از HVOF اعمال شدند. لوله‌های 1، 5، 6 و 10 نیز پوشش داده نشد [45]. مقاطع عرضی از نمونه‌های در معرض دید نشان داد که همه پوشش‌ها در قسمت تاج (یعنی موقعیت‌های ساعت 12) خوردگی سمت آتش را روی سطوح خود تجربه کرده‌اند، اما تنها پوشش‌های آلیاژ 625 HVOF به طور کامل از بین رفته‌اند (هر دو نوع سیل نشده و سیل شده، همان‌طور که در شکل 9 و 10 نشان داده شده است). با این حال، با نگاهی به اطراف سطوح لوله، مشخص شد که بسیاری از آنها به سمت کناره‌های لوله‌ها دچار کاهش ضخامت شده و خورده شده‌اند (یعنی در زوایای بیشتر از 60 نسبت به تاج لوله). شکل 9 (ب) داده‌های موجود توسط اندازه‌گیری‌های ضخامت با Elcometer قبل از ایجاد شرایط تهاجمی را در پنج مکان شعاعی برای هر یک از پوشش‌های سیل نشده روی لوله 8 نشان می‌دهد. پس از قرار گرفتن در معرض محیط، اندازه‌گیری ضخامت پوشش در 6 فاصله در اطراف سطح مقطع لوله انجام شد. نتایج این موارد در شکل 9 (ج) برای همان پوشش‌های لوله 8 و در شکل 9 (د) برای یک نسخه بدون سیل همان پوشش‌ها (لوله 3) نشان داده شده است [45]. این داده‌ها بر ضخامت‌های پوشش بسیار بیشتر در نواحی "تاج" (یا موقعیت‌های ساعت 12) تاکید دارند که در شکل 9 (ج) و (د) در صفر درجه روی محور x نشان داده شده‌اند، و ضخامت‌های پوشش در هر یک از این دو نشان داده شده است. این داده ماکزیمم باید با داده‌های تولید شده پیش از قرارگیری در محیط تهاجمی مقایسه شوند (مثلاً شکل 9 (ب))، که نشان می‌دهد پوشش‌ها از نواحی "تاج" نازک‌تر می‌شوند (یعنی هر دو طرف موقعیت 3 در شکل 9 (الف)). با توجه به تغییر ضخامت پوشش در اطراف لوله‌ها که منجر به از دست رفتن کل پوشش شده است، برای به دست آوردن داده‌های کمی در مورد عملکرد پوشش، لازم است از حداکثر اندازه‌گیری ضخامت پوشش (مرتبط با "تاج‌های" لوله) قبل و بعد از قرار گرفتن در محیط استفاده شود. شکل 10 کاهش ضخامت پوشش محاسبه شده برای هر یک از پوشش‌ها با و بدون لایه سیل را نشان می‌دهد. از آنجایی که هیچ پوشش HVOF IN625 در هر دو مورد باقی نمانده است، این پوشش به وضوح عملکرد بدتری داشته است (با آسیب خوردگی بیش از ضخامت پوشش 320-330). با این حال، تمام پوشش‌های دیگر به طور مشابه با سطوح آسیب بین 50 تا 75 در طول قرار گرفتن در معرض 25000 ساعت (یعنی 2 تا 3 در هر 1000 ساعت) عمل کرده‌اند. هیچ مزیت آشکاری از سیل وجود نداشت. برای اکثر پوشش‌ها، ظاهراً نسخه سیل شده کمی بیشتر از نسخه بدون سیل، خورده شده بود [45]. شکل 11 (الف) ضخامت پوشش‌های سیل شده را پس از قرار گرفتن در معرض محیط تهاجمی نشان داد، که نشان می‌دهد تنها HVOF Ni-50Cr در سطح بالادست لوله‌ها عملکرد خوبی

¹ Sealant

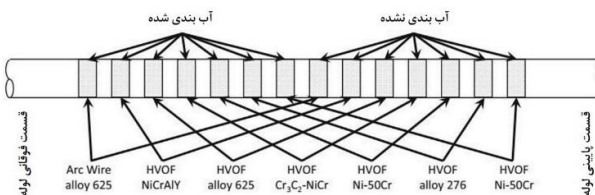
داشته است، اما تمام پوشش‌ها در اطراف بقیه سطوح لوله وجود داشت. اندازه‌گیری‌های پوشش قبل از قرارگیری در محیط تهاجمی، در محدوده 250 تا 350 میکرومتر بود (شکل 11 ب). برخی از پوشش‌ها ضخامت اولیه‌شان به طور متوسط 100 میکرومتر کمتر از سایرین بود. شکل 11 ج) تفاوت بین میانگین ضخامت پوشش قبل از قرار گرفتن در معرض محیط تهاجمی برای این نمونه‌ها و ضخامت‌های اندازه‌گیری شده در سطوح کناری/ پایین دست نمونه‌ها پس از قرار گرفتن در معرض محیط تهاجمی را نشان می‌دهد. نتایج برای پوشش‌های HVOF، کاهش ضخامت 220 تا 260، را نشان می‌دهد (یعنی 9 تا 10 در هر 1000 ساعت). با این حال، پوشش‌های آلیاژ سیم قوس 625 با میانگین کاهش ضخامت پوشش پایین دست 300 میکرومتر (یعنی 12 در هر 1000 ساعت) عملکرد بدتری داشتند [45].

جدول 7- ترکیب پوشش به کار رفته برای اواپراتور و سوپرهیتر [45]

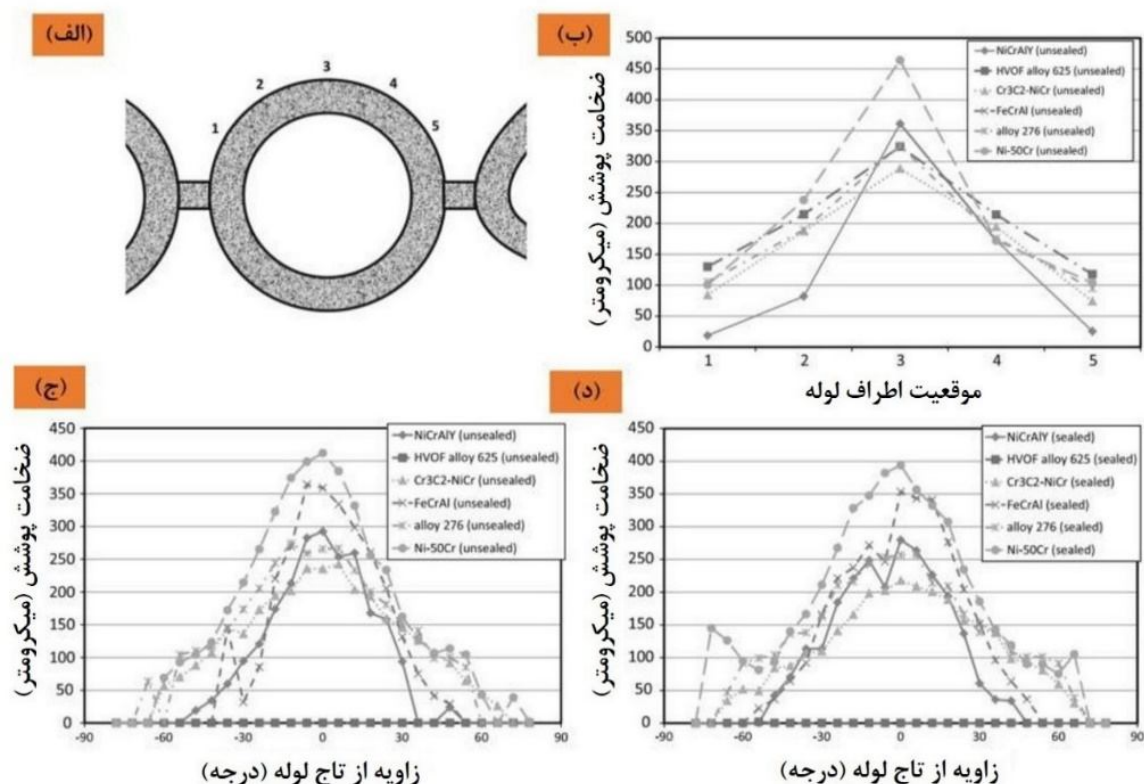
ترکیب (درصد وزنی)								ترکیب پوشش
Si	Ni	Mo	Mn	Fe	Cr	C	Al	
2/1	Bal	-	-	1/1	46/0	0/1	-	Ni-50Cr
0/83	-	-	0/76	Bal	21/7	0/03	5/9	FeCrAl
-	Bal	-	-	-	22/0		9/9	NiCrAlY
0/31	Bal	15/4	0/38	4/01	15/6	0/01	0/05	NiCrMoWFe (Alloy 276)
0/1	35/2	-	-	0/2	56/1	7/7		Cr ₃ C ₂ -NiCr matrix
0/13	Bal	8/9	-	0/1	21/3		0/2	NiCrMo (Nb+Ta)(alloy 625)



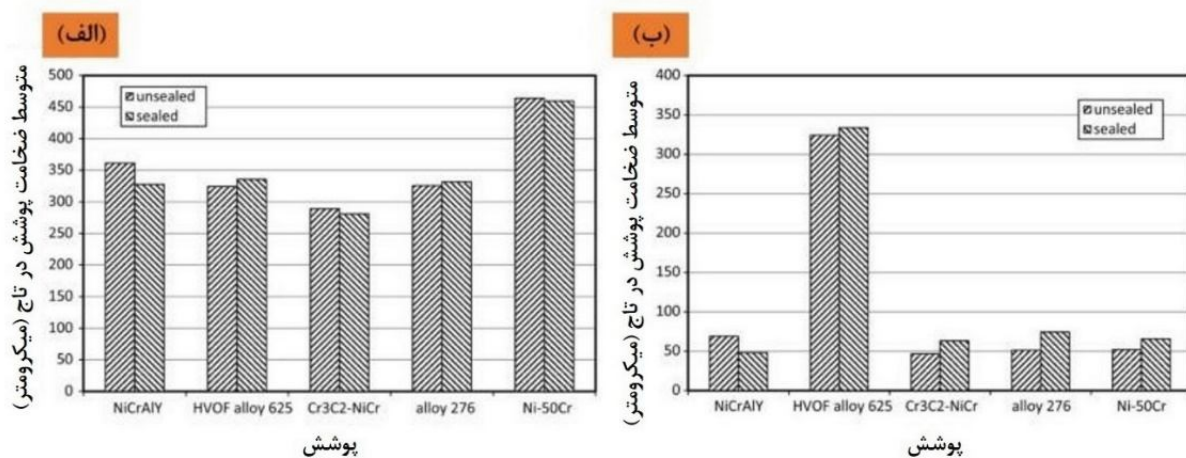
شکل 7- توزیع پوشش روی پانل واتروال - همه توسط HVOF اعمال می‌شود به جز یکی با روش اسپری سیم [45]



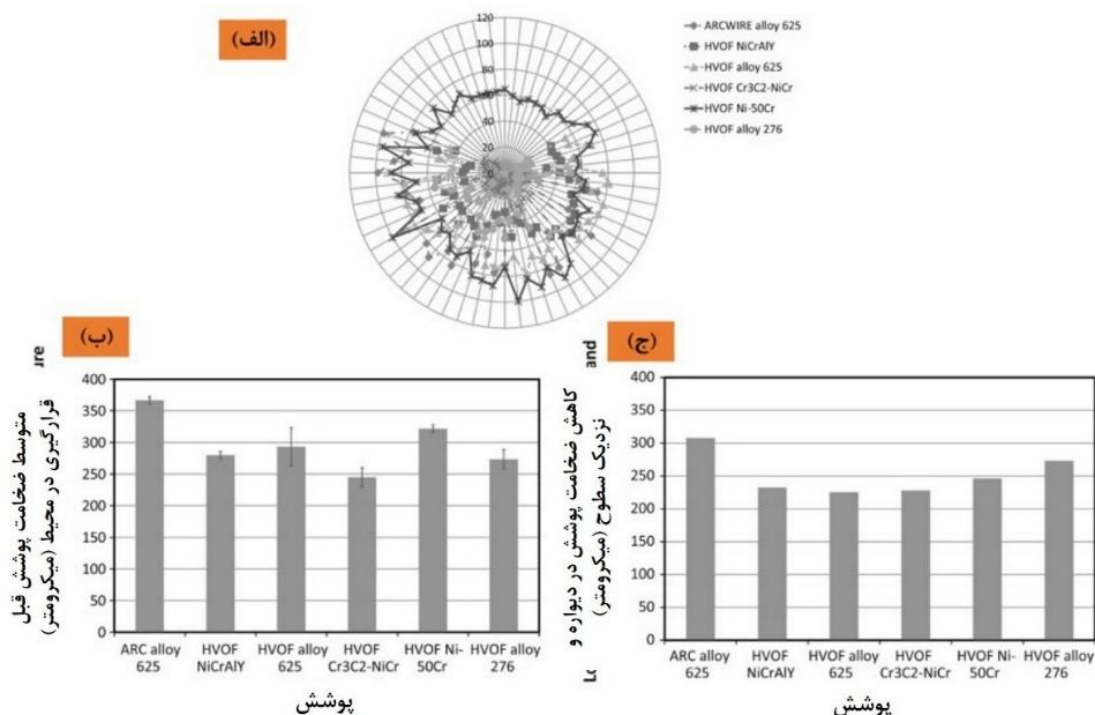
شکل 8- توزیع پوشش روی پایه خروجی سوپرهیتر صفحه اصلی و پایه ورودی سوپرهیتر همرفتی ثانویه [45]



شکل 9- الف) تغییر در ضخامت پوشش HVOF بدون سیل در اطراف لوله‌های اواپراتور 3 و 8 قبل و بعد از قرار گرفتن در معرض محیط ته‌اجمی.، ب) قبل از قرار گیری، ج) بعد از قرار گیری - پوشش‌های بدون سیل، د) پس از قرار گیری - پوشش‌های سیل شده [45]



شکل 10- ضخامت‌های پوشش اواپراتور 3 و 8 ایجاد شده با HVOF. الف) میانگین ضخامت پوشش در تاج‌های لوله واتروال، ب) کاهش ضخامت پوشش از تاج‌های لوله واتروال [45]



شکل 11- نمونه هایی از اجرای پوشش روی سوپرهیتر. (الف) ضخامت پوشش به عنوان تابعی از موقعیت شعاعی اطراف سوپرهیتر (روی لوله بالادست در بالا)، (ب) میانگین ضخامت پوشش قبل از قرار گرفتن بر روی سوپرهیتر، (ج) میانگین کاهش ضخامت پوشش از طرفین و وجهه‌های پایین دست در طول قرار گرفتن در محیط تهاجمی بر روی سوپرهیتر [45]

5- نتیجه‌گیری

خوردگی داغ یک مشکل جدی در کاربردهای دمای بالا برای اجزای مختلف بویلر نیروگاه‌ها است. شدت این مشکل زمانی افزایش می‌یابد که سوخت با عیار پایین در بویلرهای نیروگاه استفاده می‌شود، زیرا به دلیل در دسترس نبودن سوخت با عیار بالا و هزینه‌های مربوط به تهیه، از سوخت با عیار پایین استفاده می‌شود. تنها راه حل برای افزایش طول عمر لوله‌های بویلر استفاده از پوشش‌های اسپری حرارتی برای مقابله با مشکل خوردگی داغ است. فن‌آوری‌های پاشش حرارتی امکان تولید پوشش‌های پیچیده را بر روی انواع سطوح فلزی با استفاده از مواد مختلف پوششی خاص فراهم می‌کند. این پوشش‌ها با مجموعه‌ای از خواص برتر مشخص می‌شوند که عبارتند از: 1) مقاومت در برابر خوردگی بالا، همچنین در دماهای بالا، 2) مقاومت در برابر فرسایش بالا 3) امکان بازسازی پوشش‌ها در محل استفاده. این ویژگی‌ها امکان استفاده گسترده از آنها را در حفاظت از عناصر بویلر فراهم می‌کند. نتایج مقاله مروری نشان داد که پوشش‌های Ni-20Cr و کامپوزیت آن‌ها را می‌توان با موفقیت روی فولادهای بویلر با استفاده از فرآیندهای اسپری حرارتی مختلف رسوب داد. علاوه بر این، نیکل آلیاژ شده با کروم (Ni-20Cr) به Cr_2O_3 اکسید می‌شود و سایر فازهای اسپینل محافظ مانند $NiCr_2O_4$ ، که آن را برای استفاده تا دمای 950 درجه سانتیگراد برای مقابله با خوردگی داغ در محیط‌های مختلف مناسب می‌کند. به عنوان یک نتیجه از فرآیندهای رسوب، خوردگی و فرسایش که می‌تواند در این شرایط عملیاتی رخ دهد، این مسائل باید به طور کامل برای اجزای حیاتی (مانند مبدل‌های حرارتی، سیستم

های تمیز کردن گاز و توربین های گاز) بررسی شود تا شرایط بالقوه محدود کننده عمر شناسایی شود. دانش کامل از این فرآیندها و پاسخ های سیستم های مواد فعلی، انتخاب مواد و زمان بندی نگهداری را تسهیل می کند، خطر خرابی غیرمنتظره قطعات را کاهش می دهد و شرایطی را که نیاز به توسعه مواد یا سیستم های پوشش جدید دارد، شناسایی می کند.

6- منابع

- [1] Rapp, R.A. , Y.-S. Zhang, "Hot corrosion of materials: fundamental studies", *Jom*, Vol.46, pp. 47-55, 1994.
- [2] Srikanth, S., et al., "Analysis of failures in boiler tubes due to fireside corrosion in a waste heat recovery boiler", *Engineering failure analysis*, Vol. 1, No.1, pp. 59-66., 2003.
- [3] Eliaz, N., G. Shemesh, R. Latanision, "Hot corrosion in gas turbine components", *Engineering failure analysis*, Vol.9, No.1, pp. 31-43, 2002.
- [4] Wen, Z., et al., "Self-powered textile for wearable electronics by hybridizing fiber-shaped nanogenerators, solar cells, and supercapacitors", *Science advances*, Vol. 2, No.10, pp. e1600097, 2016.
- [5] Yu, H., et al., "Effect of Si addition to improve the performance of type II and type I hot corrosion resistance of aluminide coating", *Corrosion Science*, Vol. 212, pp. 110937, 2023.
- [6] Ozkan, D., "Structural characteristics and wear, oxidation, hot corrosion behaviors of HVOF sprayed Cr₃C₂-NiCr hardmetal coatings", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 457, pp. 129319, 2023.
- [7] Chikhalikar, A.S., E.P. Godbole, D.L. Poerschke, "Approach for statistical analysis of oxide-and sulfate-induced hot corrosion of advanced alloys", *Corrosion Science*, Vol. 211, pp. 11089, 2023.
- [8] A.S. Khanna, *High temperature oxidation in Handbook of environmental degradation of materials*, Elsevier, pp. 105-15, 2005.
- [9] Simms, N., P. Kilgallon, J. Oakey, Degradation of heat exchanger materials under biomass cofiring conditions. *Materials at High Temperatures*, 24(4): pp. 333-34, 2007.
- [10] Sidhu, H.S., B.S. Sidhu, S. Prakash, "Mechanical and microstructural properties of HVOF sprayed WC-Co and Cr₃C₂-NiCr coatings on the boiler tube steels using LPG as the fuel gas", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 171, No. 1, pp. 77-82, 2006.
- [11] Oakey, J.E., *Power plant life management and performance improvement.*, Elsevier, 2011.
- [12] J., Stringer, I.G. Wright, *Current limitations of high-temperature alloys in practical applications. Oxidation of Metals*, 44: pp. 265-30, 1995.
- [13] Khartchenko, N.V. , V.M. Kharchenko, *Advanced energy systems*, CRC Pres, 2013.
- [14] Robinson, A., et al., Fireside issues associated with coal-biomass cofiring. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Sandia National Laboratories, Federal Energy Technology Center. NREL/TP-570-25767, 1998.
- [15] K., Natesan, A. Purohit, D. Rink, *Coal-ash corrosion of alloys for combustion power plants*, Argonne National Lab., Argonne, IL (US), 2003.
- [16] Shingledecker, J.P. , I.G. Wright, Evaluation of the Materials Technology Required for a 760° C Power Steam Boiler. 2006, Oak Ridge National Lab.(ORNL), Oak Ridge, TN (United States).
- [17] Kumar, S., R. Bhatia, H. Singh, "Hot corrosion behaviour of CNT reinforced zirconium yttrium coatings in molten salt environment", *Journal of Bio-and Tribo-Corrosion*, Vol. 6, pp. 1-9, 2020.
- [18] Goyal, K., R. Goyal, "Improving hot corrosion resistance of Cr₃C₂-20NiCr coatings with CNT reinforcements", *Surface engineering*, Vol. 36, No.11, pp. 1200-1209, 2020.
- [19] Viswanathan, V., R. Purgert, P. Rawls, "Coal-fired power materials: major advances in materials technology over the last decade have enabled building coal-fired power plants with much higher

- efficiencies than the current generation", *Advanced Materials & Processes*, Vol. 166, No.8, pp. 47-50, 2008.
- [20] Matthews, S., B. James, M. Hyland, "High temperature erosion of Cr_3C_2 -NiCr thermal spray coatings—The role of phase microstructure", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 203, No.9, pp. 1144-1153, 2009.
- [21] Burakowski, T., Wierzchoń T. *Inżynieria powierzchni metali*. WNT, Warszawa, 1995.
- [22] Wang, B.Q., K. Luer, "The erosion-oxidation behavior of HVOF Cr_3C_2 -NiCr cermet coating", *Wear*, Vol. 174, No. 1-2, pp. 177-185, 1994.
- [23] Hearley, J., J. Little, A. Sturgeon, "The erosion behaviour of NiAl intermetallic coatings produced by high velocity oxy-fuel thermal spraying", *Wear*, Vol. 2, No.33, pp. 328-33, 1999.
- [24] Szymański, K., et al., "Thermally sprayed coatings resistant to erosion and corrosion for power plant boilers-A review", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 268, pp. 153-164, 2015.
- [25] Shi, H., et al., "Ash deposition of Zhundong coal in a 35 ·MW pulverized coal furnace: Influence of sulfation", *Fuel*, Vol. 260, pp. 116317, 2020.
- [26] Mudgal, D., S. Singh, S. Prakash, "Corrosion problems in incinerators and biomass-fuel-fired boilers", *International Journal of Corrosion*, 2014.
- [27] Kumar, S., et al., "Performance of thermal-sprayed coatings to combat hot corrosion of coal-fired boiler tube and effect of process parameters and post-coating heat treatment on coating performance: a review", *Surface Engineering*, Vol. 37, No.7, pp. 833-860, 2021.
- [28] Singh, G., N. Bala, V. Chawla, "Oxidation behaviour of HVOF sprayed NiCrAlY and NiCrAlY-20SiC coatings on T-91 boiler tube steel", *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, Vol. 56, pp. 134-150, 2020.
- [29] Singh, G., N. Bala, V. Chawla, "Microstructural analysis and hot corrosion behavior of HVOF-sprayed Ni-22Cr-10Al-1Y and Ni-22Cr-10Al-1Y-SiC (N) coatings on ASTM-SA213-T22 steel", *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, Vol. 27, pp. 401-416, 2020.
- [30] Wang, T.-G., et al., "Design of a separation device used in detonation gun spraying system and its effects on the performance of WC-Co coatings", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 203, No.12, pp. 1637-1644, 2009.
- [31] Goyal, K., H. Singh, R. Bhatia, "Behaviour of carbon nanotubes- Cr_2O_3 thermal barrier coatings in actual boiler". *Surface Engineering*, Vol. 36, No.2, pp. 124-134, 2020.
- [32] Singh, V., K. Goyal, R. Goyal, "Improving the hot corrosion resistance of boiler tube steels by detonation gun sprayed coatings in actual boiler of thermal power plant", *Anti-Corrosion Methods and Materials*, Vol. 66, No.4, pp. 394-402, 2019.
- [33] Singh, A., K. Goyal, R. Goyal, "An investigation on hot corrosion behaviour of cermet coatings in simulated boiler environment", *Journal of Bio-and Tribo-Corrosion*, Vol. 5, pp. 1-7, 2019.
- [34] Yamada, K., et al., "Hot corrosion behavior of boiler tube materials in refuse incineration environment. Vacuum", Vol. 65, No. 3-4, pp. 533-540, 2002.
- [35] Ak, N., et al., "NiCr coatings on stainless steel by HVOF technique", *Surface and coatings technology*, Vol. 174, pp. 1070-1073, 2003.
- [36] Singh, H., D. Puri, S. Prakash, "Some studies on hot corrosion performance of plasma sprayed coatings on a Fe-based superalloy", *surface and coatings technology*, Vol. 192, No.1, pp. 27-38, 2005.
- [37] Sidhu, B.S., D. Puri, S. Prakash, "Mechanical and metallurgical properties of plasma sprayed and laser remelted Ni-20Cr and Stellite-6 coatings", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 159, No.3, pp. 347-355, 2005.
- [38] Sidhu, T., S. Prakash, "R. Agrawal, Performance of high-velocity oxyfuel-sprayed coatings on an Fe-based superalloy in Na_2SO_4 -60% V_2O_5 environment at 900 C part II: Hot corrosion behavior of the coatings", *Journal of materials engineering and performance*, Vol. 15, pp. 130-138, 2006.
- [39] Suresh Babu, P., et al., "Effect of feedstock size and its distribution on the properties of detonation sprayed coatings", *Journal of thermal spray technology*, Vol. 16, pp. 281-290, 2007.

- [40] Huang, C., Y. Zhang, R. Vilar, "Microstructure and anti-oxidation behavior of laser clad Ni-20Cr coating on molybdenum surface", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 205, No.3, pp. 835-840, 2010.
- [41] Kaushal, G., H. Singh, S. Prakash, "High-temperature erosion-corrosion performance of high-velocity oxy-fuel sprayed Ni-20 Cr coating in actual boiler environment", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 42, pp. 1836-1846, 2011.
- [42] Kamal, S., R. Jayaganthan, S. Prakash, "Mechanical and microstructural characteristics of detonation gun sprayed NiCrAlY+ 0.4 wt% CeO₂ coatings on superalloys", *Materials chemistry and physics*, Vol.122, No.1, pp. 262-268, 2010.
- [43] Kaushal, G., H. Singh, S. Prakash, "Comparative high temperature analysis of HVOF-sprayed and detonation gun sprayed Ni-20Cr coating in laboratory and actual boiler environments", *Oxidation of metals*, 2011, Vol. 76, pp 169-191.
- [44] Bala, N., H. Singh, S. Prakash, "Characterization and high-temperature oxidation behavior of cold-sprayed Ni-20Cr and Ni-50Cr coatings on boiler steels", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 42, pp. 3399-3416, 2011.
- [45] Simms, N., et al. "Assessment of Coating Performance on Waterwalls and Superheaters in a Pulverised Fuel-Fired Power Station", *Oxidation of Metals*, Vol. 88, No.1, pp. 165-177, 2017.